用 Wood 模型拟合长三角地区中国荷斯坦牛产奶量及乳成分变化曲线

孙先枝[1] 安朋朋[1] 郭 美[1] 孙咏梅[1] 金 婷[1] 刘光磊[1,2]*

（1.上海奶牛育种中心有限公司，上海 200436；2.光明牧业有限公司，上海 200436）

摘 要：本研究旨在采用 Wood 模型拟合长三角地区中国荷斯坦牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率和乳中体细胞评分（SCS）的变化曲线。以长三角地区 10 个大中型牧场中国荷斯坦牛（1~3 胎）的 104 368 条数据为基础，利用 Wood 模型对产奶量、乳脂率、乳蛋白率和乳中 SCS 数据进行曲线拟合。结果表明：1）中国荷斯坦牛产奶量为标准泌乳曲线，而乳脂率、乳蛋白率和 SCS 变化则为倒抛物线形。2）Wood 模型对产奶量的拟合度最高，各胎次均为 0.98 以上，其次为乳中 SCS，各胎次的拟合度均在 0.93 以上，而各胎次的乳脂率的拟合度也均在 0.92 以上。3）1、2 胎产奶量高峰出现时间与乳中 SCS 最低值出现时间相近，而乳脂率最低值出现时间相对较晚。4）1 胎高峰产奶量（32.426 3 kg/d）较 2、3 胎低，而 1 胎维持高产奶量（4.98）及乳蛋白率的持续力（4.19）较 2、3 胎能力强。综合各指标可以得出，Wood 模型适用于长三角地区中国荷斯坦牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率及乳中 SCS 变化曲线的拟合。

关键词：Wood 模型；产奶量；乳成分；体细胞评分；泌乳曲线；长三角中国荷斯坦牛

中图分类号：S823

泌乳曲线是用来描述奶牛泌乳期内产奶量、乳脂率、乳蛋白率等性状随泌乳时间变化而变化的曲线。泌乳曲线模型在奶牛生产中有较强的指导意义，它除了能够提供个体动物的泌乳模型，还可以进行单体动物泌乳期和群体动物泌乳期的比较，甚至在动物出现某种临床型疾病之前就可以进行判定，从而对奶牛产奶量预测、遗传潜力估计、选种等方面起到重要的作用。自 Gains[1]首次使用数学模型描述了泌乳期内产奶量与泌乳天数之间的函数关系以来，国际上陆续开展了泌乳曲线的数学模型的研究。典型的泌乳曲线模型有 Wood 不完全伽玛函数模型（简称 Wood 模型）、Wilmink（WIL）模型、逆多项式（IQP）模型、Ali-Schaeffer

---

收稿日期:2017-11-6

基金项目：农业新品种及良种良法示范推广（沪农科推字（2016）第 1-1-6 号）

作者简介：孙先枝（1987-），女，江苏宿迁人，中级畜牧师，硕士研究生，从事反刍动物营养的研究。E-mail: sunxianzhi@brightdairy.com

*通信作者:刘光磊，高级畜牧师，E-mail: liuguanglei@brightdairy.com

（AS）模型等[2-5]。如 Da Cunha 等[6]分别使用并比较了 Wood 模型、Wilmenk 模型及 Dijkstra 模型这 3 种模型的拟合效果。Marek 等[7]比较了 7 种泌乳曲线模型拟合的优势，结果表明 Wood 模型、Nelder 模型和 Marek-Zelinkova 模型的拟合效果较好。国内也有研究者使用以上模型对奶牛泌乳曲线进行了大量研究，赵智华等[8]、毛永江等[9]、努尔比亚·吾布力等[10]分别研究了不同模型拟合中国荷斯坦奶牛的泌乳曲线。对于乳脂率和乳蛋白率等乳成分指标而言，目前可用于描述其变化的模型并不多，且研究的结果差异较大。

本研究拟采用 Wood 模型对上海奶牛育种中心有限公司长三角地区 10 个牛场的中国荷斯坦牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率及乳中体细胞评分（somatic cell score,SCS）这 4 个主要的泌乳性状的变化曲线进行拟合，定量地描述其变化趋势，为中国荷斯坦牛的生产管理及主要泌乳性状的预测提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　数据来源

数据来源为长三角地区 10 个牧场 2014-2016 年 1~3 胎中国荷斯坦牛共 123 765 条奶牛性能测定体系(DHI)测定日记录（每个月记录 1 次），由上海奶牛育种中心有限公司提供。为保证分析结果的可靠性，对不完整的数据不进行分析，同时剔出了极端异常的产奶量及乳成分数据，对 DHI 测定数据进行的限定如下：泌乳时间为产后 7~336 d，产奶量为 5~60 kg，乳脂率为 2%~7%，乳蛋白率为 2%~6%，乳中体细胞数（somatic cell count，SCC，）为 1~5 ×10^6 个/mL。考虑乳中体细胞数呈偏态分布，用如下公式转化为 SCS[11]：

$$SCS=\log_2^{SCC/100}+3。$$

最后符合条件的数据共 104 368 条。数据基本情况见表 1。

表 1　数据基本情况（平均值±标准差）

Table 1　Details of analyzed data（M±SD）

胎次 Parity	样本量 Sample No.	产奶量 Milk yield/kg	乳脂率 Milk fat percentage/%	乳蛋白率 Milk protein percentage/%	乳中体细胞数 Milk SCC/（×10^3 个/mL）
1	56 947	29.49±7.83	3.81±0.88	3.05±0.31	174.54±418.30
2	25 818	32.76±10.52	3.77±0.90	3.14±0.35	242.96±535.40
3	16 238	33.00±11.40	3.78±0.90	3.11±0.36	326.07±634.46
合计 Total	104 368	30.92±9.39	3.79±0.89	3.08±0.33	217.22±494.53

1.2　泌乳曲线拟合

用 Wood 不完全伽玛函数对产奶量、乳脂率、乳蛋白率和乳中 SCS 4 个指标的变化进行拟合，基本模型如下[12]：

$$Y_t=at^be^{ct}。$$

式中：t 为泌乳周数；Y_t 为 t 时间的产奶量、乳脂率、乳蛋白率或乳中 SCS；a、b、c 为模型参数：a 为产犊后的初始产奶量、乳脂率、乳蛋白率和 SCS；b 为达到峰值的倾斜度参数；c 为下降的倾斜度参数。当参数 b 为正值，c 为负值时，该模型可用于产奶量的拟合分析；当参数 b 为负值，c 为正值时，该模型适合于拟合乳脂率、乳蛋白率和乳中 SCS 的拟合分析。在进行曲线拟合时，各参数初始值的确定采用 Oloria 等[13]计算所得的结果，并利用如下公式换算出以下二级参数：

$$T_{max}=b/c；$$

$$T_{min}=b/c；$$

$$Y_{max}=a(b/c)^be^{-b}；$$

$$Y_{min}=a(b/c)^{-b}e^b；$$

$$Per=-(b+1)\ln c。$$

式中：T_{max} 为在拟合产奶量时达到产奶量高峰所需的时间，即产奶量高峰出现时间；T_{min} 为拟合乳脂率、乳蛋白率和乳中 SCS 时，该指标达最低值的时间；Y_{max} 为高峰产奶量；Y_{min} 为乳脂率、乳蛋白率和乳中 SCS 的最低值；Per 为泌乳持久力。

1.3　数据分析

考虑到胎次对拟合效果影响较大，故对不同胎次数据分别进行拟合。所有产奶量数据均先用 Excel 初步整理，再用 Mtalab 进行拟合，拟合效果用拟合度（R^2）和均方误差进行评价。

2　结　果

2.1　产奶量、乳脂率、乳蛋白率和 SCS 变化曲线的基本特征

用 Wood 模型拟合 1、2、3 胎中国荷斯坦牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率和乳中 SCS 变化曲线分别见图 1、图 2、图 3。从图 1、2、3 可以看出，测定日产奶量曲线为标准泌乳曲线，泌乳曲线均呈现先上升后较缓慢下降的变化趋势；而乳脂率、乳蛋白率及乳中 SCS 变化曲线则相反，呈现开口向上的倒抛物线变化，从最高点逐渐下降至最低点后又都具有逐渐

上升的趋势。

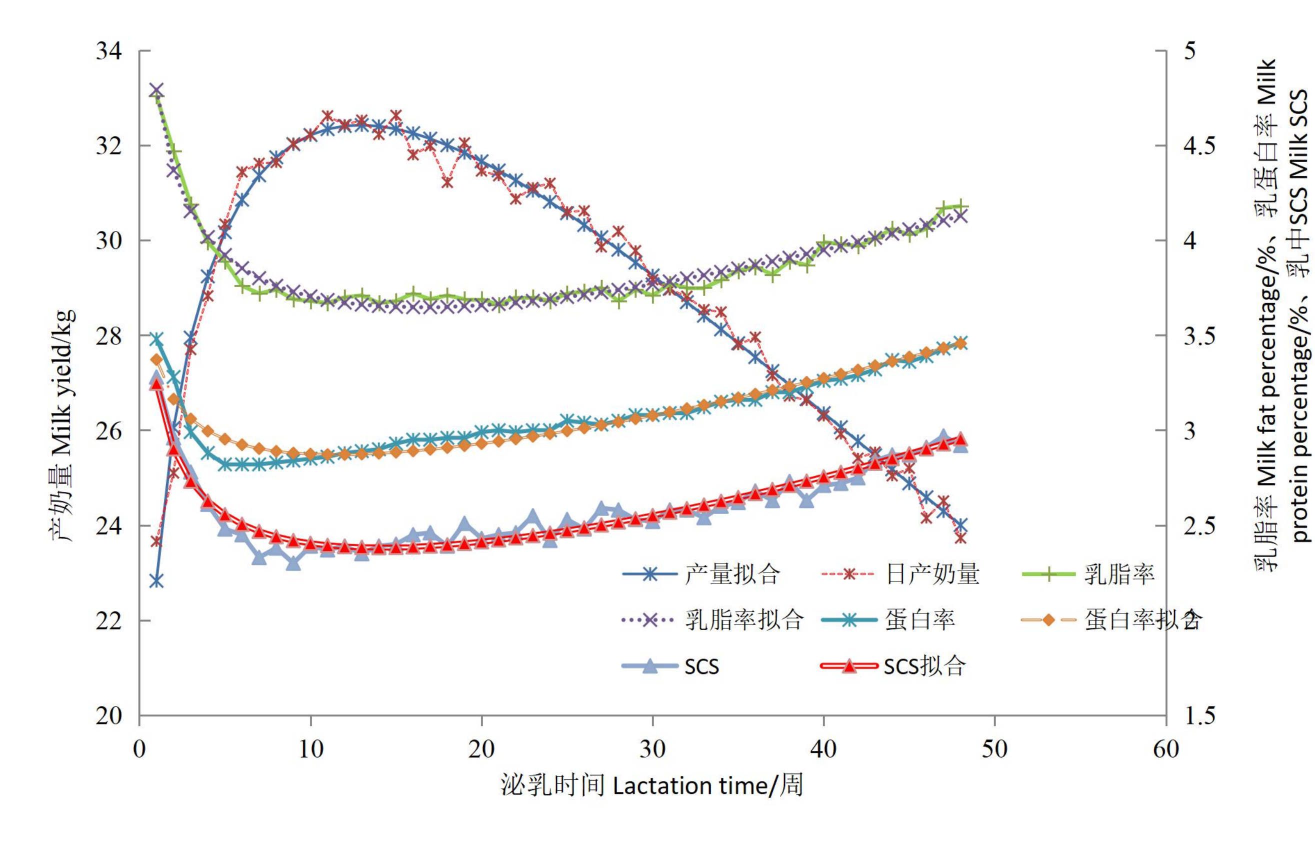


图 1　Wood 模型对 1 胎奶牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率及乳中 SCS 的拟合曲线

Fig.1　Fitting curves ofmilk yield, milk fat percentage, milk protein percentage and milk SCS for first parity daiy cows by Wood’s model

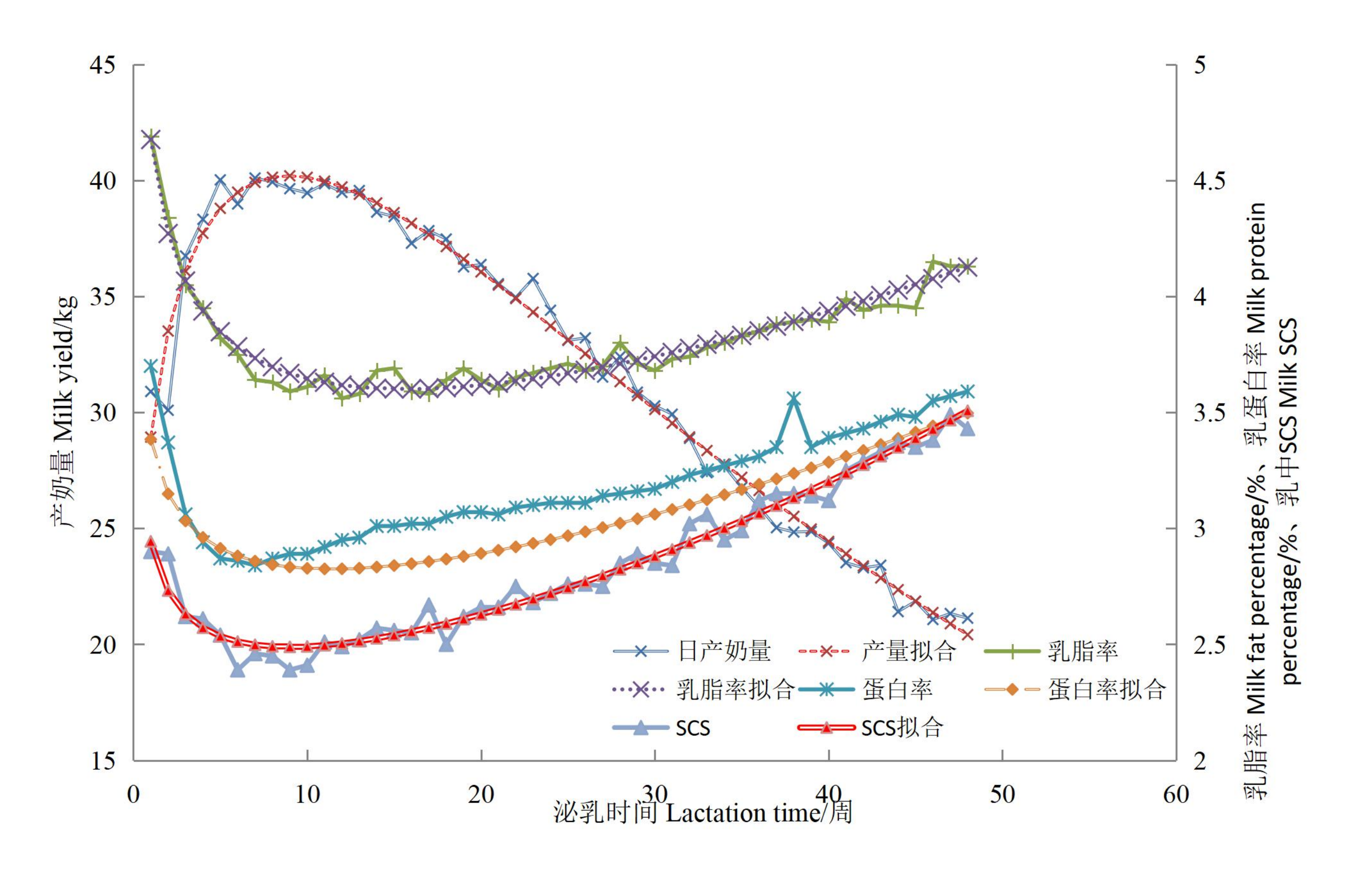


图 2　Wood 模型对 2 胎奶牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率及乳中 SCS 的拟合曲线

Fig.2　Fitting curves of milk yield, milk fat percentage, milk protein percentage and milk SCS for second parity daiy cows by Wood’s model

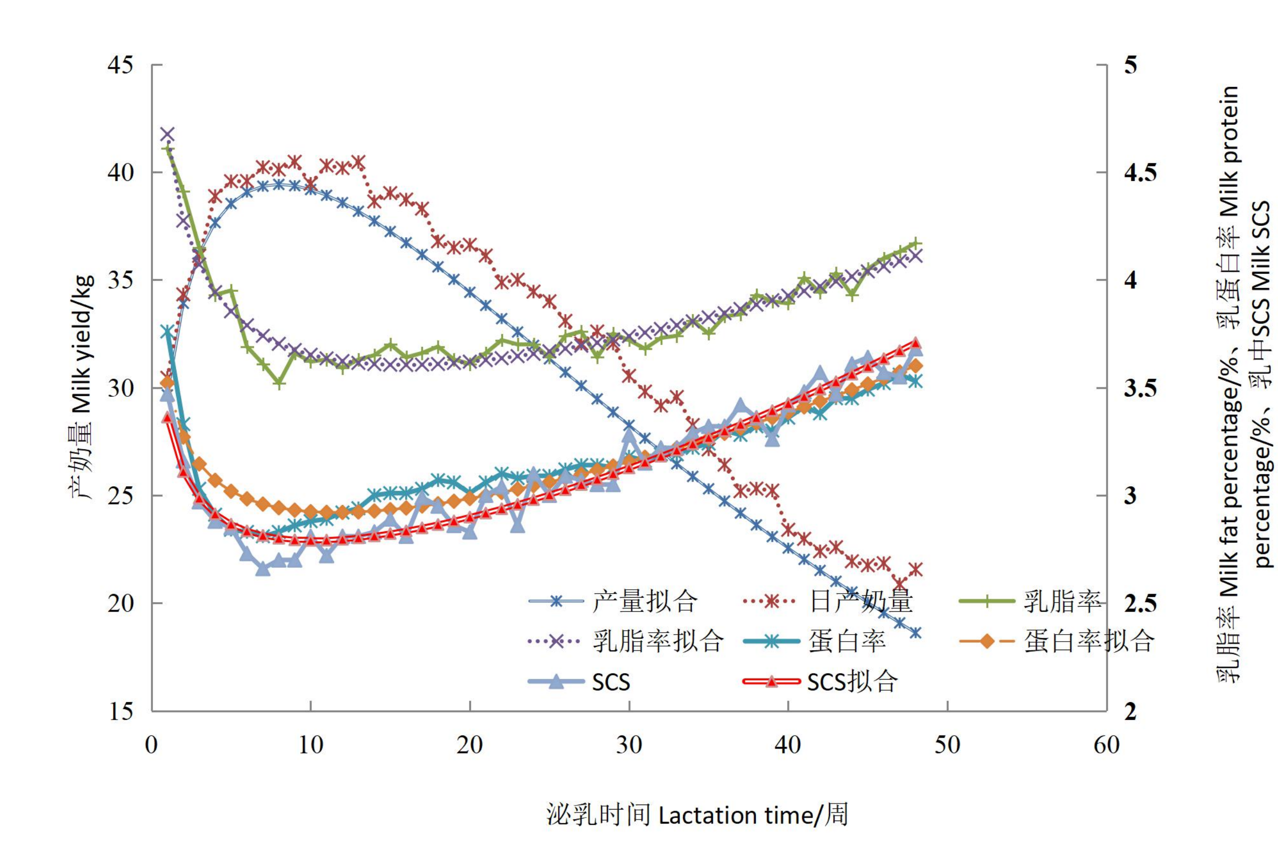


图 3　Wood 模型对 3 胎奶牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率及乳中 SCS 的拟合曲线

Fig.3　Fitting curves of milk yield, milk fat percentage, milk protein percentage and milk SCS for third parity daiy cows by Wood's model

2.2　不同胎次产奶量、乳脂率、乳蛋白率和 SCS 变化曲线拟合效果及参数

不同胎次产奶量、乳脂率、乳蛋白率和 SCS 变化曲线拟合参数、拟合度及均方误差见表 2。从表 2 可知，产奶量曲线的拟合准确性最高，各胎次的拟合度均在 0.98 以上。乳中 SCS 曲线的拟合准确性其次，各胎次的拟合度均在 0.93 以上。比较不同胎次乳脂率泌乳曲线拟合度可知，1 和 2 胎较高，均为 0.96，3 胎较低，为 0.92。不同胎次的乳蛋白率泌乳曲线拟合度也均高于 0.88。

从各胎次拟合曲线图和二级参数可以看出，对于产奶量而言，1 胎到产奶量高峰出现时间最晚，高峰产奶量也最低，但持续力最强，2 和 3 胎到产奶量高峰出现时间分别为 8.95 和 8.04 周，高峰产奶量也较高，但持续力也较低。对于乳脂率而言，2 胎乳脂率最先达到最低点；对于乳蛋白率而言，1、2、3 胎均在 11 周左右达到最低点，且各胎次的乳蛋白率持续力基本相当；对于 SCS 而言，1 胎到达最低值的时间最晚，2 胎到达最低值的时间最早。

表 2　不同胎次产奶量、乳脂率和乳蛋白率 Wood 拟合参数及拟合度

Table 2 The fitness and parameters for lactation curve of milk yield, fat percentage and protein percentage with Wood's model

项目 Items	胎次 Parity	a	b	c	高峰出现时间 Time of peak milk yield/周	达最低值时间 Time reaching the minimum value/周	高峰产奶量 Peak milk yield/kg	最低值 Minimum value	持续力 Persistence	拟合度 R^2	均方误差 Residual Mean Squares
产奶量 Milk yield	1	23.210 0	0.214 5	-0.016 6	12.92		32.426 3		4.98	0.99	0.112 6
	2	29.760 0	0.252 3	-0.028 2	8.95		40.194 5		4.47	0.98	0.668 9
	3	30.540 0	0.235 5	-0.029 3	8.04		39.423 0		4.36	0.99	0.371 9
乳脂率 Milk fat percentage	1	4.750 0	-0.146 6	0.008 9		16.47		3.65	4.03	0.96	0.001 9
	2	4.633 0	-0.144 0	0.009 2		15.65		3.60	4.01	0.96	0.002 2
	3	4.633 7	-0.142 5	0.009 0		15.83		3.60	4.04	0.92	0.004 2
乳蛋白率 Milk protein percentage	1	3.341 0	-0.105 3	0.009 2		11.45		2.87	4.19	0.93	0.002 6
	2	3.348 2	-0.119 0	0.010 5		11.33		2.83	4.01	0.90	0.005 3
	3	3.484 0	-0.121 7	0.010 5		11.59		2.92	4.00	0.88	0.0062
乳中 SCS Milk SCS	1	3.206 0	-0.181 0	0.012 9		14.03		2.38	3.56	0.93	0.003 0
	2	2.902 0	-0.128 4	0.014 3		8.98		2.49	3.70	0.97	0.003 2
	3	3.322 0	-0.131 4	0.012 9		10.19		2.79	3.78	0.94	0.074 6

乳脂率、乳蛋白率最低值单位为%。

Units of milk fat percentage and milk protein percentage were %.

3 讨 论

3.1 不同胎次荷斯坦牛泌乳曲线拟合效果的比较分析

本研究发现，1 胎产奶量高峰出现时间为 12.92 周（90 d），2、3 胎分别为 8.95（63 d）和 8.04 周（56 d），与毛永江等[14]报道的 1、2、3 胎的产奶量高峰出现时间分别为 9.9(70 d)、7.4（58 d）和 7.6 周（53 d）基本一致，1 胎的产奶量高峰出现时间延后，但与熊本海等[15]报道的中国北方荷斯坦奶牛 1、2、3 胎的产奶量高峰出现时间分别为 67、30、33 d 相比均滞后，导致这种差异的原因可能是熊本海等[15]研究中所采用饲养环境及测定产奶量的频率较多，而本研究中长三角地区奶牛是采用 1 个月记录 1 次泌乳数据的方案，泌乳高峰到来之前，可能没有泌乳数据记录，或者只有 1 次数据记录，预测产奶量高峰出现时间相对就可能延后。

另外，就泌乳持续力分析，1 胎的泌乳持续力为 4.98，均高于 2 和 3 胎，这与 Friggens 等[16]报道的结果一致。另外，对于产奶量而言，1、2、3 胎的拟合度均为在 0.98 以上，说明 Wood 模型对于产奶量有很好的拟合效果。

3.2 不同胎次荷斯坦奶牛乳脂率曲线拟合效果的比较分析

比较不同胎次乳脂率泌乳曲线拟合度可知，1 和 2 胎高（均为 0.96），3 胎低（0.92）。这说明用 Wood 模型对乳脂率进行预测时，1 和 2 胎较准确，3 胎相对较差。且 2 胎乳脂率最先达到最低点（15.65 周），而 1 胎乳脂率最后达到（16.47 周），3 胎居中。这与张美荣等[17]和罗清尧等[18]研究结果相似。这说明 1 胎乳脂率变化相对较小，用 Wood 模型进行曲线拟合效果相对较好，而 2 胎乳脂率变化相对较大，故准确性稍差。但总体来说，本研究各胎次拟合度均在 0.90 以上，可以用于中国荷斯坦牛乳脂率变化趋势的预测分析。

3.3 不同胎次荷斯坦奶牛乳蛋白率曲线拟合效果的比较分析

比较不同胎次乳蛋白泌乳曲线拟合度可知：1 胎最高（0.93），其次是 2 胎(0.90)，3 胎最低（0.88）。这说明用 Wood 模型对乳蛋白率进行预测时，1 胎最准确，其次为 2 胎，3 胎最差。且 2 胎乳蛋白率最先达到最低点（11.33 周），而 3 胎乳蛋白率最后达到最低点（11.59 周）。本研究获得的乳蛋白率拟合曲线均呈现先降低后升高的趋势，即泌乳初期较高，随后逐渐下降，随后逐渐上升，这与 Steri 等[19]研究的描述乳蛋白率变化曲线的规律基本相似。各胎次均在 11 周左右达到最低点，这与熊本海等[15]报道的乳蛋白率在 6~8 周达到最低点存在差异，可能是由于奶牛在不同的饲养环境下，饲喂管理方面的不同造成的。

3.4 不同胎次荷斯坦奶牛乳中 SCS 曲线拟合效果的比较分析

比较不同胎次乳中 SCS 曲线拟合度可知，各胎次均大于 0.93，且均方误 差较小，特别是 2 胎的拟合度最高,为 0.97，这与 Gołębiewski 等[20]和毛永江等[14]的研究不一致，他们的研究结果表明,Wood 模型不适宜用来拟合乳中 SCS 和 SCC 的变化规律，这可能与本研究所采用实际生产所取得的大样本统计有关，更适合用 Wood 模型进行拟合。

4 结 论

①Wood 模型能极好地拟合荷斯坦奶牛的泌乳曲线，并较好地拟合乳中 SCS、乳蛋白率和乳脂率曲线。

②产奶量曲线为标准的泌乳曲线，而乳脂率、乳蛋白率和 SCS 变化曲线则为倒抛物线

形。

参考文献：

[1] GAINS 待补充

[2] WOOD P D P.Algebraic model of the lactation curve in cattle[J].Nature,1967,216(5111):164–165.

[3] WILMINK J B M.Adjustment of test day milk,fat and protein yield for age,season and stage of lactation[J].Livestock Production Science,1987,16(4):335–348.

[4] NELDER J A.Inverse polynomials,a useful group of multifactor response fuctions[J].Biometrics,1966,22(1):128–141.

[5] ALI T E,SCHAEFFER L R.Accounting for covariance among test day milk yields in dairy cow[J].Canadian Journal of Animal Science,1987,67(3):637–644.

[6] DA CUNHA D D N F V,PEREIRA J C,CAMPOS O F,et al.Selection of models of lactation curves to use in milk production simulation systems[J].Revista Brasileira de Zootecnia,2010,39(4):891–902.

[7] MAREK J,RAJMON R,HALOUN T.Critical evaluation of seven lactation curve estimation models[C]//ABRAHAM A,JIANG X,SNÁŠEL V,et al,Eds.Intelligent data analysis and applications.Cham:Springer,2015:73–84.

[8] 赵智华,彭顺清,李凤翔,等.用 Wood 模型拟合四川地区黑白花奶牛泌乳曲线的研究[J].四川畜牧兽医,2000,27(1S):19–20.

[9] 毛永江,张亚琴,许兆君,等.中国荷斯坦牛泌乳曲线拟合研究[J].畜牧兽医学报,2011,42(9):1239–1248.

[10] 努尔比亚·吾布力,付雪峰,热西提•阿不都热依木,等.新疆农七师荷斯坦牛不同模型泌乳曲线拟合效果分析[J].中国奶牛,2012(17):19–22.

[11] POLOTT G E.Deconstructing milk yield and composition during lactation using biologically based lactation models[J].Journal of Dairy Science,2004,87(8):2375–2387.

[12] TORSHIZI M E.Effects of season and age at first calving on genetic and phenotypic characteristics of lactation curve parameters in Holstein cows[J].Journal of Animal Science and

Technology,2016,58:8.

[13] OLORIA V E,BROTHERSTONEA S,HILLA W G,et al.Fit of standard models of the lactation curve to weekly records of milk production of cows in single herd[J].Livestock Production Science,1999,58(1):55–63.

[14] 毛永江,张美荣,许兆君,等.用 Wood 模型拟合南方中国荷斯坦牛产奶量、乳脂率、乳蛋白率和体细胞评分及其效果分析[J].畜牧兽医学报,2012,43(12):1904–1909.

[15] 熊本海,杨亮,杨琴,等.中国北方荷斯坦奶牛乳产量及乳成分变化的普适模型构建[J].畜牧兽医学报,2014,45(12):1939–1948.

[16] FRIGGENS N C,EMMANS G C,KYRIAZAKIS I,et al.Feed intake relative to stage of lactation for dairy cows consuming total mixed diets with a high or low ratio of concentrate to forage[J].Journal of Dairy Science,1998,81(8):2228–2239.

[17] 张美荣,廖想想,陈丹,等.产犊季节、胎次及牛场对荷斯坦牛泌乳性能的影响[J].中国牛业科学,2012,38(4):6–9.

[18] 罗清尧,熊本海,马毅,等.中国荷斯坦奶牛第二泌乳期泌乳曲线模型的研究[J].中国农业科学,2010,43(23):4910–4916.

[19] STERI R,CAPPIO-BORLINO A,MACCIOTTA N P P.Modelling extended lactation curves for milk production traits in Italian Holsteins[J].Italian Journal of Animal Science,2009,8(2S):165–167.

[20] GOŁĘBIEWSKI M,BRZOZOWSKI P,GOŁĘBIEWSKI L.Analysis of lactation curves,milk constituents,somatic cell count and urea in milk of cows by the mathematical model of Wood[J].Acta Veterinaria Brno,2011,80(1):73–80.

Fitting of Changing Curves of Milk Yield and Milk Composition of Chinese Holstein Dairy Cows in Yangtze River Delta using Wood's Model

SUN Xianzhi[1] AN Pengpeng[1] GUO Mei[1] SUN Yongmei[1] JIN Ting[1] LIU Guanglei[1,2*]

(1. *Shanghai Dairy Cow Breeding Center Co., Ltd.*, *Shanghai* 200436, *China*; 2. *Guangming Animal Husbandry Co., Ltd.*, *Shanghai* 200436, *China*)

*Correspondin author, senior engineer, E-mail: liuguanglei@brightdairy.com

(责任编辑 王智航)

Abstract: This study aimed to fit the changing curves of milk yield, milk fat percentage, milk protein percentage and milk somatic cell score (SCS) of Chinese Holstein dairy cows in Yangtze river delta using Wood's model. Data at the amount of 104 368 was collected from ten medium or large size farms of Chinese Holstein dairy cows (first to third parities) in Yangtze river delta, and Wood's model was used to fit the changing curves of milk yield, milk fat percentage, milk protein percentage and milk somatic cell score. The result showed as follows: 1) the curve of milk yield of Chinese Holstein was the standard lactation curve, and the curves of milk fat percentage, milk protein percentage and milk SCS showed the reversed parabola shape. 2) The goodness of fit was above 0.98 for milk yield of different parities, then following with that of milk SCS of different parities, which was above 0.93, and the goodness of fit was above 0.92 for milk fat percentage of different parities. 3) The time of peak milk yield of the first and second parities was close to that reaching the lowest milk SCS, and the lowest milk fat percentage appeared relatively late. 4) The peak milk yield of the first parity （32.426 3 kg/d） was lower than that of the second and third parities, while the persistence of keeping high milk yield (4.98) and milk protein percentage (4.19) of the first parity was higher than those of the second and third parities. It can be concluded that Wood's model is suitable for fitting of curves of milk yield, milk fat percentage, milk protein percentage and milk SCS of Chinese Holstein dairy cows in Yangtze river delta.

Key words: Wood's model; milk yield; milk composition; somatic cell score; lactation curve; Chinese Holstein dairy cows in Yangtze river delta